

О.С. ОВСАК,¹ В.М. ВАЩЕНКО,² А.П. ВІДЬМАЧЕНКО^{1,3}

¹ Головна астрономічна обсерваторія НАН України

(Вул. Академіка Заболотного, 27, Київ 03143; e-mail: ovsak@mao.kiev.ua)

² Міжвідомчий центр фундаментальних досліджень в галузі енергетики та екології

(Пл. Шевченка, 1, Одеса 65044; e-mail: nucleoroid@gmail.com)

³ Національний університет біоресурсів і природокористування України

(Вул. Героїв оборони, 15, Київ 03041; e-mail: vida@mao.kiev.ua)

ВІДНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВО-АЕРОЗОЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА АТМОСФЕРИ НАД ПОЗИЦІЄЮ CESAR OBSERVATORY, НІДЕРЛАНДИ

УДК 539

З використанням раніше запропонованого авторами Методу відновлення параметрів багатомодової аерозольної складової атмосфери, проаналізовано дані поляризаційних вимірювань неба над позицією CESAR Observatory, Нідерланди. В атмосфері над позицією виявлена присутність двох аерозольних мод з нормально-логарифмічним розподілом частинок за розмірами й відновлено низку їх мікрофізичних параметрів. Для грубодисперсної моди визначено дійсну частину показника заломлення $n_r = 1,53$, ефективний радіус частинок $r = 0,9$ мкм, їх дисперсія $\sigma^2 = 0,36$, ваговий коефіцієнт цієї моди у загальній величині ступеню лінійної поляризації аерозольної суміші $\text{coef}_1 = 0,1$. Для дрібнодисперсної моди $n_r = 1,49$, $r = 0,11$ мкм, $\sigma^2 = 0,4$. Кількісне співвідношення вказаних аерозольних мод у повітрі над позицією спостереження складало приблизно 1:9. Визначено спектральні величини відносного вкладу газового розсіяння: $\beta(870 \text{ нм}) = 0,3$ і $\beta(675 \text{ нм}) = 0,46$. Відмічено некоректність використання моделі однократного розсіювання Релея у короткохвильовій ділянці видимого спектру світла та при значній насиченості повітря аерозолями. Продемонстровано суттєвий вплив багатократного розсіювання світла на результати поляриметричних вимірювань на довжині хвилі 441 нм за вказаних атмосферних умов проведення спостережень неба.

Ключові слова: земна атмосфера, дистанційні вимірювання, ступінь лінійної поляризації, аерозоль, відновлення мікрофізичних параметрів.

1. Вступ

Значний вплив діяльності людей на хімічний склад та насиченість аерозолями шарів атмосфери над

містами й територіями з розвинутою промисловістю, потужними видобувними підприємствами, великими транспортними розв'язками, автомагістралями тощо, потребує виконання рутинних процедур екологічного моніторингу повітря. Крім того, не рідкісні техногенні катастрофи та природні катаклізми значно розширюють вказане поле діяльності відповідних муніципальних відділів та підрозділів державних служб з надзвичайних ситуацій. Доповнюючи контактні методи аналізу газової та аерозольної компонент атмосфери, в

Цитування: Овсак О.С., Ващенко В.М., Відьмаченко А.П. Відновлення параметрів газово-аерозольного середовища атмосфери над позицією CESAR Observatory, Нідерланди. *Укр. фіз. журн.* **70**, № 8, 503 (2025).

© Видавець ВД "Академперіодика" НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

ISSN 2071-0194. *Укр. фіз. журн.* 2025. Т. 70, № 8

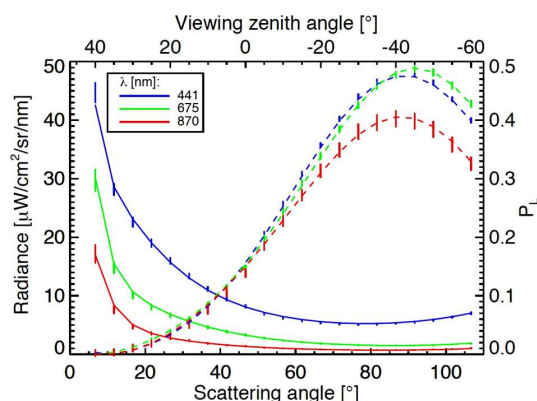


Рис. 1. Вимірювання (відображені у вигляді вертикальних штрихів похибок) і результати роботи алгоритму пошуку найкращої відповідності спектральної яскравості Radiance (суцільні криві) і ступеню лінійної поляризації P_L (штрихові криві), як функції кута розсіювання у головній площині. Позиція CESAR Observatory, 9 липня 2013 р., 14:55 UTC [7]

останні десятиліття надшвидкими темпами розвиваються методи дистанційного дослідження земної атмосфери. Для них розробляється вимірювальне обладнання, а також створюються спеціальні математичні алгоритми визначення загальних спектральних оптичних характеристик атмосфери та мікрофізичних параметрів її аерозольної складової [1, 2, 3].

В роботі [4] авторами запропоновано Метод відновлення мікрофізичних параметрів багатомодової аерозольної складової атмосфери за даними спектральних поляриметричних вимірювань неба (далі по тексту Метод), який дозволяє визначити кількість основних аерозольних мод та ряд мікрофізичних параметрів їх частинок, а також спектральні значення загальних параметрів газово-аерозольного середовища атмосфери. Як практичний приклад використання Методу, приведено покроковий процес відновлення параметрів атмосфери з використанням даних вимірювань, виконаних достатньо давно [5]. Відновлені з застосуванням Методу характеристики основних аерозольних мод атмосфери виявилися близькими до результатів, отриманих для тієї ж позиції спостереження, але вже за даними сучасних вимірювань й з використанням алгоритмів аналізу мережі “AERONET” [6].

Цілями даної роботи були перевірка ефективності роботи алгоритмів Методу при обробці спектральних фазових залежностей ступеню лінійної

поляризації неба отриманих в [7], та порівняння відновлених мікрофізичних параметрів частинок аерозольних мод зі значеннями відповідних величин, отриманими в [7], а також з параметрами, визначеними засобами вимірювань й алгоритмами обробки даних мережі “AERONET” [8].

2. Основна частина

В роботі [7] представлені результати радіаційних і поляриметричних вимірювань неба над позицією Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR Observatory), Нідерланди (51,971° N, 4,927° E). Вимірювання проведені за допомогою спеціально для цього розробленого спектрополяриметричного інструменту groundSPEX. З використанням отриманих за умов ясного неба даних вимірювань від 9 липня 2013 р., 14:55 UTC, побудовані графіки спектральних залежностей яскравості й ступеню лінійної поляризації (DoLP) неба від кута розсіювання світла у головній площині, див. рис. 1. Також там приведені модельні криві, розраховані за алгоритмами розв’язання оберненої задачі [9, 10] з використанням значень параметрів аерозольної складової атмосфери, відновлених групою забезпечення groundSPEX.

За вказаними вище спектральними фазовими залежностями DoLP неба у цій роботі виконано відновлення мікрофізичних параметрів частинок грубо-дисперсної (Coarse mode) і дрібнодисперсної (Fine mode) аерозольних мод у небі над спостережною позицією CESAR Observatory, станом на 9 липня 2013 р., 14:55 UTC. Визначені: ефективний радіус (r) і дисперсія (σ^2) функції нормально-логіфімічного розподілу частинок за розмірами; дійсна частина комплексного показника заломлення частинок (n_r). Для параметра DoLP у Coarse mode підібраний ваговий коефіцієнт (coef_1), що дозволило коректно сформувати загальну величину DoLP аерозольної складової атмосфери. Крім того, визначені спектральні значення параметра відносного вкладу молекулярного розсіювання $\beta(\lambda)$ в атмосфері на довжинах світлових хвиль $\lambda = 675$ нм та $\lambda = 870$ нм. Усі послідовні етапи виконання цієї роботи розглянуті далі по тексту.

Якісний аналіз приведених на рис. 1 залежностей показав, що, незважаючи на відмічені в [7] умови проведення вимірювань за ясного неба, абсолютні величини DoLP не досягають значення

0,5 навіть у короткохвильовому діапазоні видимого світла. Це, очевидно, вказує на присутність значної кількості аерозолі у повітряному стовпі під час проведення вимірювань, що й призвело до суттєвого зменшення спостережних величин DoLP неба, а також знизило точність вимірювань, особливо на малих кутах розсіювання світла. Крім того, спектральні відмінності спостережних залежностей DoLP неба свідчать про значний вплив розсіювання світла на частинках саме дрібнодисперсної моди атмосферного аерозолі.

Спектральні залежності DoLP неба від кута розсіювання світла у головній площині приведені в [7] лише у графічному вигляді (див. рис. 1), тому їх було оцифровано за допомогою програмного забезпечення Graph2Digit 0.7.1b¹. Для кожного кута розсіювання визначалися значення DoLP, усереднені по приведеним вертикальним штрихам, рівним похибці вимірювань.

Відновлення параметрів газопо-аерозольного середовища атмосфери виконано із застосуванням згаданого вище Методу. Тут ми лише коротко приведемо його ключові особливості та формули, а детальніше з ним можна ознайомитися в [4]. Основною ідеєю Методу є представлення досліджуваної атмосфери однорідним газопо-аерозольним модельним середовищем, спектральні фазові характеристики DoLP якого визначаються конкретним набором мікрофізичних параметрів. Дані фазових вимірювань DoLP неба над спостережною позицією порівнюються з відповідними розрахованими залежностями DoLP для модельного середовища й підбиранням значень його мікрофізичних параметрів за допомогою алгоритму Методу добиваються найліпшого узгодження вказаних залежностей DoLP. Для цього виконується мінімізація відповідних функцій Root-Mean-Square Deviation (RMSD), графічний вигляд яких наглядно демонструє процес визначення значень шуканих параметрів.

Залежність DoLP ($P(\alpha, \lambda)$) модельного газопо-аерозольного середовища від кута розсіювання світла та від довжини хвилі має вигляд [11]:

$$P(\alpha, \lambda) = \beta(\lambda) \cdot P'_R(\alpha) + (1 - \beta(\lambda)) \cdot P_a(\alpha, \lambda), \quad (1)$$

де α – кут розсіювання світла; $P'_R(\alpha)$ – газова складова DoLP; $P_a(\alpha, \lambda)$ – аерозольна складова DoLP;

$\beta(\lambda)$ – спектральна величина відносного вкладу молекулярного розсіювання в середовищі:

$$\begin{aligned} \beta(\lambda) &= \sigma_R(\lambda) / [\sigma_R(\lambda) + \sigma_a(\lambda)] \equiv \\ &\equiv \tau_R(\lambda) / [\tau_R(\lambda) + \tau_a(\lambda)], \end{aligned} \quad (2)$$

де $\sigma_R(\lambda)$, $\tau_R(\lambda)$ і $\sigma_a(\lambda)$, $\tau_a(\lambda)$ – об'ємні коефіцієнти розсіювання та оптичні товщини газової й аерозольної складових атмосфери на довжині хвилі λ .

Газова складова у загальному DoLP неба залежить від зміни кута розсіювання світла та, за Методом, враховує однократне розсіювання на молекулах атмосферних газів (розсіювання Релея):

$$P'_R(\alpha) = \sin^2(\alpha) / (1 + \cos^2(\alpha) + \delta / (1 - \delta)), \quad (3)$$

де δ – показник деполаризації. За малої оптичної товщини газової складової земної атмосфери ($\tau_R \ll 1$) величина $P'_R(\alpha)$ мала б досягати максимальних значень $\approx 95\%$ на кутах розсіювання 90° і 270° . В реальних умовах, через деполаризуючий вплив багатократного розсіювання, спостережна величина $P'_R(\alpha)$ є меншою й особливо суттєво у короткохвильовій ділянці видимого світла.

Для врахування природи й параметрів функції розподілу частинок за розмірами у аерозольній складовій атмосферного середовища, за Методом вона представляється об'єднанням полідисперсних систем однорідних сферичних частинок з нормально-логіфімічною функцією розподілу за розміром – аерозольних мод. Зокрема, при використанні моделі атмосферного середовища, що містить дві основні аерозольні моди, сумарна величина DoLP аерозольної складової визначається за виразом:

$$\begin{aligned} P_a(\alpha, \lambda) &= \text{coef}_1 \cdot P_{a1}(\alpha, \lambda, \rho_1, n_{r1}) + (1 - \text{coef}_1) \times \\ &\times P_{a2}(\alpha, \lambda, \rho_2, n_{r2}), \end{aligned} \quad (4)$$

де $P_{a1}(\alpha, \lambda, \rho_1, n_{r1})$ – складова DoLP, сформована аерозольною модою 1; $P_{a2}(\alpha, \lambda, \rho_2, n_{r2})$ – те ж для моди 2; coef_1 – ваговий коефіцієнт моди 1, ; $\rho_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot r_{1,2} / \lambda$ – параметр Мі моди 1, 2; $r_{1,2}$ – ефективний радіус аерозольних частинок моди 1, 2; $m_{1,2} = n_{r1,2} - i n_{i1,2}$ – комплексний показник заломлення (КПЗ) частинок моди 1, 2, $n_{r1,2}, n_{i1,2}$ – значення дійсної та уявної частини КПЗ частинок моди 1, 2. Підкреслимо, що у алгоритмі Методу поглинанням світла в неперервному спектрі

¹ <https://soft.mydiv.net/win/download-Graph2Digit.html>.

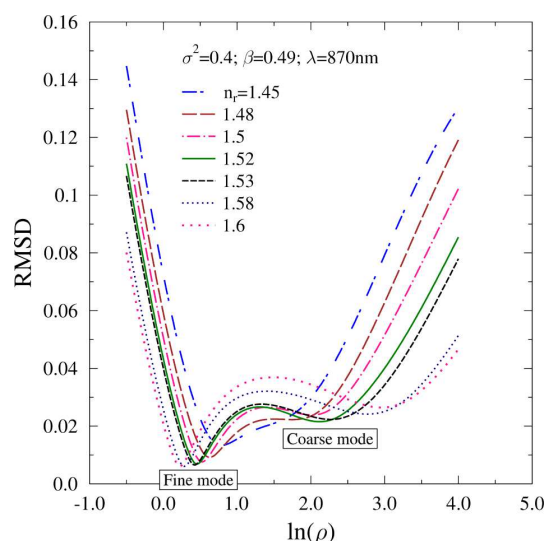


Рис. 2. Об'єднання залежностей функції RMSD від $\ln(\rho)$ при зміні значень n_r модельних аерозольних частинок

нехтується, бо переважаюча більшість виявлених у земній атмосфері аерозольних частинок є слабо поглинаючими [4]. До того ж у Методі використовуються залежності DoLP неба, отримані вимірюваннями за умов ясного неба, коли присутність у повітрі навіть сильно поглинаючих світло частинок є дуже малою.

Процедури підбирання мікрофізичних параметрів аерозольних частинок проводилися на довжині хвилі $\lambda = 870$ нм, оскільки у довгохвильовій ділянці діапазону видимого світла вплив багатократного розсіювання на поляризаційні характеристики неба є незначним [12, 13]. Початковий етап аналізу даних виконаний за методикою, запропонованою в [14]. Його результати показали загальну картину розподілу основних мод аерозольної складової атмосфери й звузили діапазони пошуку ймовірних значень параметрів їх частинок на подальших етапах. Рис. 2 показує графічні залежності функції RMSD, розраховані в моделі одномодової аерозольної складової атмосфери ($\text{coef}_1 = 1$) у якнайширшому діапазоні фізично допустимих значень параметра M_i аерозольних частинок (в роботі використовується вираз $\ln(\rho)$) та для ряду значень дійсної частини їх показника заломлення (n_r). Нагадаємо, мінімальне значення функції RMSD відповідає кращому узгодженню обчислених модельних значень DoLP з визначеними експериментально величинами DoLP не-

ба одночасно на усіх виміряних кутах розсіювання світла. Слід відмітити, що на рис. 2 вказані значення параметрів σ^2 та β (870 нм), які використовувалися при розрахунках приведених залежностей. Ці, поки що попередні величини параметрів, підібрані нами з діапазонів їх допустимих значень усього декількома оціночними обчисленнями, а їх точні величини визначалися на подальших етапах аналізу (див. рис. 3, рис. 4). Отже, приведені на рис. 2 об'єднання розрахованих залежностей RMSD вказує на присутність двох основних мод у аерозольній складовій атмосфери над позицією спостереження. Області ймовірного існування цих мод позначені "Coarse mode" і "Fine mode". Співвідношення мінімальних значень функції RMSD в цих областях вказує на те, що кількісно Fine mode перевищує Coarse mode. Отже, для виконання подальшого аналізу, нами визначені наступні діапазони імовірних значень параметрів частинок: для обох аерозольних мод параметр n_r знаходиться в діапазоні значень 1,48–1,53; параметр $\ln(\rho_c)$ для Coarse mode шукаємо у діапазоні значень 1,5–3,0, а значення параметра $\ln(\rho_f)$ для Fine mode – у діапазоні 0,1–0,7.

Наступний етап – підбір параметрів Coarse mode. Рис. 3, *a–d* показують залежності функції RMSD, розраховані на довжині хвилі $\lambda = 870$ нм в діапазоні ймовірних значень параметрів частинок Coarse mode та параметра β_1 газово-аерозольного середовища (позначення β_1 відображає використання моделі одномодової аерозольної складової атмосфери). Як бачимо, форма кривої залежності RMSD від параметра $\ln(\rho_c)$, а також положення її мінімумів мають високу чутливість до відносно незначної зміни величини параметра β_1 , див. рис. 3, *a*. Така чутливість успішно компенсована нами покроковим підбиранням значення параметра β_1 , що значно звузило діапазон пошуку значень параметра M_i для частинок Coarse mode до 1,5...2,5 й дозволило простим усередненням визначити його найбільш ймовірну величину $\ln(\rho_c) \cong \cong 2,0$. Рис. 3, *b–d* ілюструють відновлення інших шуканих параметрів частинок Coarse mode та уточнення значення параметра β_1 . Підкреслимо, що при відновленні величини кожного наступного шуканого параметра використовуються значення інших параметрів, які вже визначені на попередніх етапах аналізу. На рис. 3, *d* показаний процес уто-

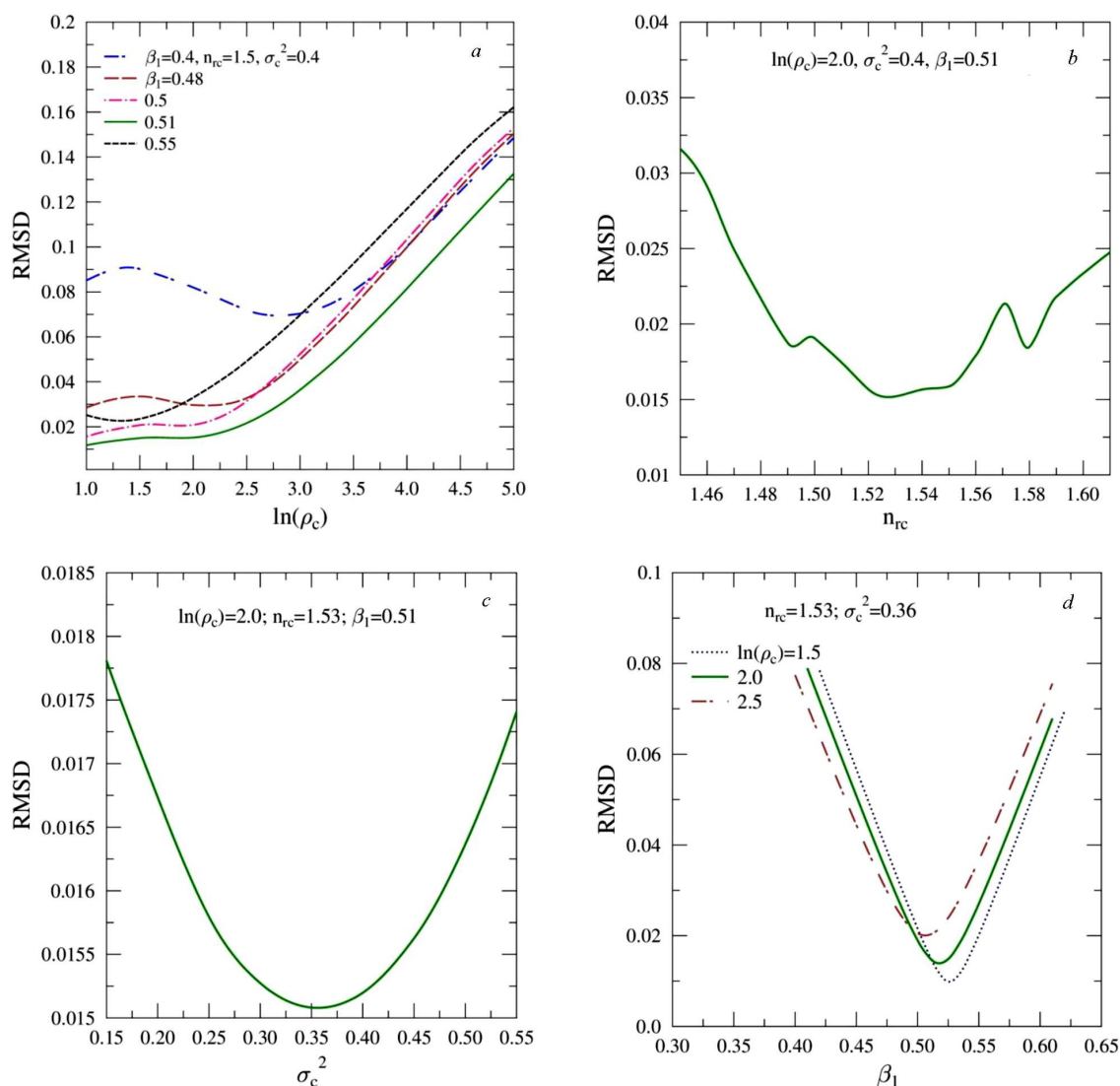


Рис. 3. Залежність функції RMSD від: параметрів часток Coarse mode одномодової аерозольної складової атмосфери: $\ln(\rho_c)$ (a); n_{rc} (b); σ_c^2 (c); параметра $\beta_1(\lambda)$ (d). Довжина хвилі $\lambda = 870$ нм

чення значення параметра β_1 . Приведені тут залежності функції RMSD від параметра β_1 , розраховані для значень параметра $\ln(\rho_c)$ у межах вже визначеного вище діапазону. Суцільною лінією показана залежність, яка розрахована при середньому значенні $\ln(\rho_c) = 2,0$ та демонструє мінімум при $\beta_1 = 0,52$. Відмітимо, що така величина параметра $\beta_1(870 \text{ нм})$ виявилася значно більшою від значення $\beta_{\text{calc}}(870 \text{ нм}) = 0,295$, обчисленого згідно виразу (2) за відповідними спектральними значеннями оптичної товщини для газової та аерозоль-

ної складових атмосфери, приведених у довіднику [15]. Отже, крім вже виявленої нами при якісному аналізі рис. 2 першої ознаки присутності дрібно-дисперсної моди в атмосфері над спостережною позицією, суттєво завищене значення підбраного на цьому етапі аналізу параметра $\beta_1(870 \text{ нм})$ є другою ознакою присутності Fine mode. Тому наступним було виконано відновлення параметрів частинок Fine mode й визначене кількісне співвідношення виявлених основних мод у аерозольній складовій атмосфери.

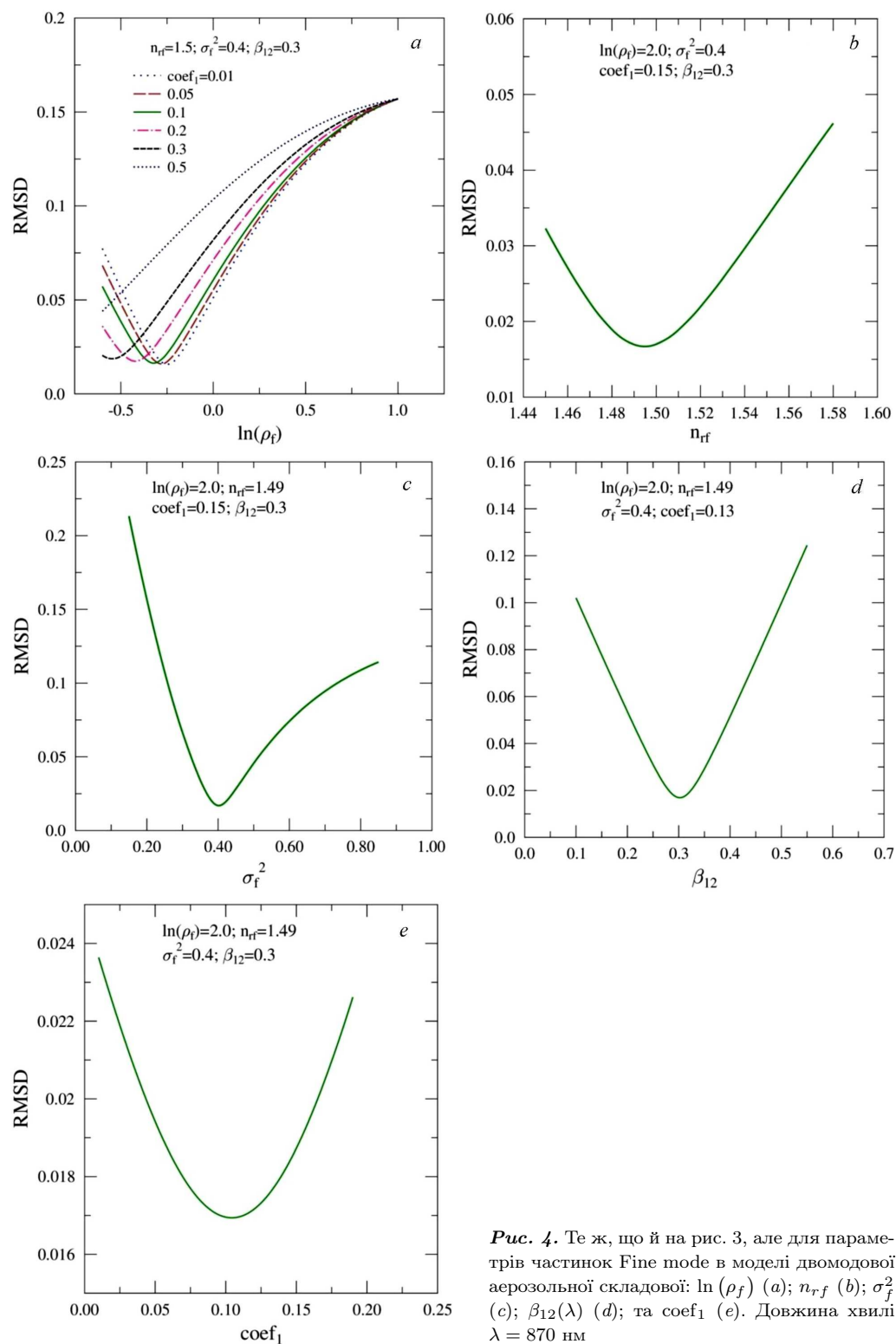


Рис. 4. Те ж, що й на рис. 3, але для параметрів частинок Fine mode в моделі двомодової аерозольної складової: $\ln(\rho_f)$ (a); n_{rf} (b); σ_f^2 (c); $\beta_{12}(\lambda)$ (d); та coef_1 (e). Довжина хвилі $\lambda = 870$ нм

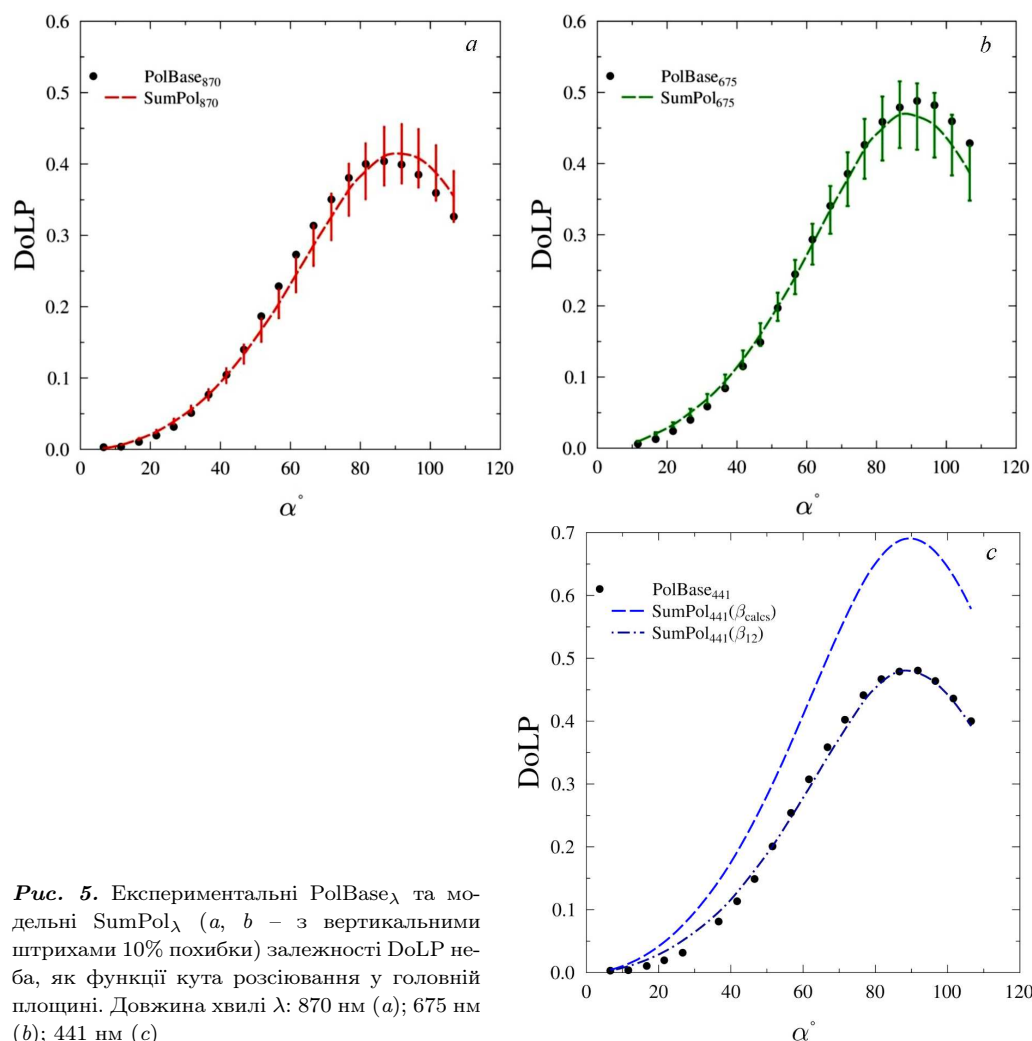


Рис. 5. Експериментальні PolBase_λ та модельні SumPol_λ (a , b – з вертикальними штрихами 10% похибки) залежності DoLP неба, як функції кута розсіювання у головній площині. Довжина хвилі λ : 870 нм (a); 675 нм (b); 441 нм (c)

Рис. 4, a – e показують розраховані на довжині хвилі $\lambda = 870$ нм залежності функції RMSD від параметрів частинок Fine mode та від зміни значення параметра β_{12} (позначення β_{12} відображає використання моделі двомодової аерозольної складової атмосфери). Згідно алгоритму Методу, величина DoLP аерозольної складової на цьому етапі аналізу формується параметром DoLP_c грубодисперсної моди та параметром DoLP_f дрібнодисперсної моди, з урахуванням вагового коефіцієнта грубодисперсної моди (4). В результаті моделювання, за положенням мінімумів функції RMSD визначені параметри частинок Fine mode й параметр β_{12} . Відмітимо, що крім залежності функції RMSD від параметра $\ln(\rho_f)$, рис. 4, a ще й де-

монструє вплив на неї величини вагового коефіцієнта coef_1 . Ці обчислення показують, що зміна величини coef_1 у діапазоні значень 0,01–0,2 дуже слабо впливає на абсолютне значення мінімуму функції RMSD, але при цьому суттєво змінює ймовірну величину параметра $\ln(\rho_f)$. Тому, з використанням вже підібраних параметрів частинок Fine mode, ми уточнили значення цього вагового коефіцієнта, що дало величину $\text{coef}_1 \cong 0,1$, див. рис. 4, e . Таким чином, оціночне значення кількісного співвідношення між Coarse mode та Fine mode у аерозольній складовій атмосфери на спостережну позицію складає приблизно 1:9. Це очікувано підтверджує наші початкові висновки щодо значного кількісного перевище-

ння дрібнодисперсної аерозольної моди над грубо-дисперсною.

Рис. 5, *a–c* демонструють спектральні залежності DoLP неба від кута розсіювання світла α° у головній площині. Тут представлені усереднені за даними рис. 1 експериментальні залежності PolBase $_{\lambda}$, а також модельні залежності SumPol $_{\lambda}$, розраховані нами з використанням відновлених у цій роботі параметрів газово-аерозольного середовища атмосфери. Згідно висновків [12], на довжинах хвиль коротших за 600 нм точність обчислень поляризаційних характеристик неба у моделі однократного розсіювання складає не вище 10%. Тому вертикальними штрихами на рис. 5, *a, b* позначені діапазони 10% похибки обчислених залежностей SumPol $_{\lambda}$. Як бачимо, на довжинах хвиль 870 нм і 675 нм модельні криві за формою є близькими до експериментальних, та у межах 10% точності обчислень перетинаються з усередненими даними вимірювань. Додатково відмітимо, що згідно Table 1 в [7], точність вимірювання залежностей PolBase $_{\lambda}$ визначається парами систематичних та випадкових похибок і для більшості досліджених кутів розсіяння світла вона значно виходить за межі 10% значення. Це ще більше розширює перетин діапазонів вимірюваних та змодельованих нами залежно-

стей DoLP неба, тому отримані в цій роботі значення відновлених параметрів можна вважати близькими до реальних. На Рис. 5с приведені результати, отримані для довжини хвилі $\lambda = 441$ нм. Тут показані залежності SumPol $_{\lambda}$, розраховані при підбраному за алгоритмом Методу значенні параметра β_{12} (441 нм) = 0,53 та при “довідниковому” значенні β_{calc} (441 нм) = 0,74. Згідно висновків [12], через вплив багатократного розсіювання світла на коротких довжинах хвиль значно зростає похибка обчислення величини DoLP неба в моделі однократного розсіювання Релея, а отже використати тут, як і на довших хвилях, діапазон похибок 10% вже неможливо. Як бачимо, залежність SumPol $_{\beta_{12}}$ є значно ближчою до експериментальної кривої PolBase $_{441}$ ніж залежність SumPol $_{\beta_{\text{calc}}}$. Причину такої розбіжності ми розглянемо нижче.

Таблиця 1 містить значення відновлених параметрів для двох основних мод аерозольної складової в небі над позицією CESAR Observatory, станом на 9 липня 2013 року, 14:55 UTC. Там же приведені діапазони значень відповідних параметрів аерозольних мод, визначені багатоденними спостереженнями на цій позиції та їх обробкою в мережі “AERONET”, а також за результатами вимірювань приладу groundSPEX [7]. Як бачимо, відновлені в даній роботі параметри аерозольних мод знаходяться у межах діапазонів значень, визначених за алгоритмами AERONET та groundSPEX. Однак відмітимо, що підібрані нами для обох аерозольних мод величини ефективного радіусу часток узгоджуються з мінімальними значеннями у вказаних діапазонах.

Таблиця 2 містить спектральні значення параметра відносного внеску молекулярного розсіювання в атмосфері, визначені за спектральними фазовими залежностями DoLP неба $\beta_{12}(\lambda)$ та обчислені за довідниковими спектральними значеннями оптичної товщини газової й аерозольної складових земної атмосфери $\beta_{\text{calc}}(\lambda)$ [15]. Підібрані за Методом спектральні значення параметрів точно відповідають довідниковим величинам $\beta_{12}(870 \text{ нм}) = \beta_{\text{calc}}(870 \text{ нм}) = 0,3$ та $\beta_{12}(675 \text{ нм}) = \beta_{\text{calc}}(675 \text{ нм}) = 0,46$, що свідчить на користь достовірності відновлених нами значень параметрів аерозольної складової.

У той же час, підібране значення параметра $\beta_{12}(441 \text{ нм}) = 0,53$ є суттєво меншим від “довідникової” величини $\beta_{\text{calc}}(441 \text{ нм}) = 0,74$. Такий ре-

Таблиця 1. Значення відновлених параметрів мод аерозольної складової атмосфери

Пара- метри	Моди аерозолію			
	Coarse mode		Fine mode	
	Джерело даних			
	Ця робота	AERONET/ groundSPEX [7]	Ця робота	AERONET/ groundSPEX [7]
r , мкм	0,9	(1,5–4,8)/ (0,8–6,5)	0,1–0,11	0,13–0,2/ 0,12–0,3
σ^2	0,36	–	0,4	–
n_r	1,53	(1,4–1,63)/ (1,42–1,58)	1,49	(1,4–1,63)/ (1,42–1,58)
coef ₁	0,1–0,11	–	–	–

Таблиця 2. Спектральні значення параметра $\beta(\lambda)$

Довжина хвилі, λ , нм	870	675	441
$\beta_{12}(\lambda)$, ця робота	0,3	0,46	0,53
$\beta_{\text{calc}}\lambda$, довідник [15]	0,295	0,46	0,74

зультат свідчить про значно завищене, порівняно з реальним, значення параметра DoLP газової складової, при його обчисленні з використанням моделі однократного розсіювання світла. Другою причиною такої відмінності ми вважаємо присутність значної кількості аерозолів в повітрі над позицією спостереження на момент виконання вимірювань, що вже відмічено нами при загальному якісному аналізі вхідних даних. Очевидно, що за таких умов значно виріс вплив багатократного розсіювання світла на поляризаційні характеристики неба, й особливо сильно це проявилось саме у короткохвильовій ділянці спектру. Це припущення підтверджується висновками в [12] щодо результатів вимірювань та обчислень поляризаційних параметрів неба в моделі однократного розсіювання Релея на довжинах хвиль, коротших за 600 нм.

3. Висновок

Продемонстрована ефективність застосування Методу відновлення мікрофізичних параметрів багатомодової аерозольної складової атмосфери при виконанні аналізу даних спектральних поляриметричних вимірювань неба, отриманих за допомогою пристрою groundSPEX над позицією CESAR Observatory, Нідерланди. Коректність відновлених значень мікрофізичних параметрів основних аерозольних мод підтверджується близькістю результатів спектральних фазових вимірювань ступеню лінійної поляризації неба над спостережною позицією й розрахованих залежностей цього ж параметра для модельного газопо-аерозольного середовища. Відновлені в роботі параметри аерозольних частинок узгоджуються з діапазонами їх ймовірних значень, визначених у мережі “AERONET” та обчислених групою забезпечення спектрополяриметра groundSPEX.

Автори щиро вдячні рецензенту за низку зауважень, врахування яких покращило якість даної публікації.

1. O. Dubovik *et al.* Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *J. Quant. Spectr. Radiat. Transf.* **224**, 474 (2019).
2. A. Morozhenko, A. Vid'machenko. *Polarimetry and Physics of Solar System Bodies. Photopolarimetry in Remote Sensing*. Edited by G. Videen, Y. Yatskiv, M. Mishchenko (Springer, 2006) [ISBN: 978-1-4020-2368-2].
3. A.V. Morozhenko, A.P. Vid'machenko, P.V. Nevodovskii. Aerosol in the upper layer of Earth's atmosphere. *Kinemat. Phys. Celest. Bod.* **29**, 243 (2013).
4. O. Ovsak, V. Vashchenko, A. Vid'machenko, Y. Loza, Z. Patlashenko, B. Ovsak. Recovery of parameters for the multimodal aerosol component in the atmosphere from spectral polarimetric measurements. *Ukr. J. Phys.* **66**, 466 (2021).
5. В.В. Аврамчук. Многоцветная поляриметрия света сумеречного и дневного неба в зените (Наукова думка, Вопр. астрофиз., 1965), с. 112–120.
6. В. Бовчалюк, Г. Міліневський, В. Данилевський, Ф. Голуб, М. Сосонкін, Ю. Юхимчук, Т. Подвін. Властивості аерозолів в атмосфері над Києвом за лідарними та фотометричними спостереженнями. *Косм. наука і техн.* **23** (6), 34 (2017).
7. G. van Harten, J. de Boer, J.H.H. Rietjens, A. Di Noia, F. Snik, H. Volten, J.M. Smit, O.P. Hasekamp, J.S. Henzing, C.U. Keller. Atmospheric aerosol characterization with a ground-based SPEX spectropolarimetric instrument. *Atmos. Meas. Tech.* **7**, 4341 (2014).
8. O. Dubovik, A. Smirnov, B.N. Holben, M.D. King, Y.J. Kaufman, T.F. Eck, I. Slutsker. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.-Atmos.* **105**, 9791 (2000).
9. A. di Noia, O.P. Hasekamp, G. van Harten, J.H.H. Rietjens, J.M. Smit, F. Snik, J.S. Henzing, J. de Boer, C.U. Keller, H. Volten. Use of neural networks in ground-based aerosol retrievals from multi-angle spectropolarimetric observations *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* **7**, 9047 (2014).
10. O.P. Hasekamp, P. Litvinov, A. Butz. Aerosol properties over the ocean from PARASOL multiangle photopolarimetric measurements. *J. Geophys. Res.* **116**, 14204 (2011).
11. A.V. Morozhenko, E.G. Yanovitskij. The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations. *Icarus* **18**, 583 (1973).
12. N.J. Pust, J.A. Shaw. How good is a single-scattering model of visible-NIR atmospheric skylight polarization? *Proc. SPIE* **7461**, 74610B (2009).
13. О.С. Угольников, И.А. Маслов. Многоцветная поляриметрия сумеречного неба. Роль многократного рассеяния света как функция длины волны. *Космич. исслед.* **40**(3), 242 (2002).
14. O.S. Ovsak, A.P. Vidmachenko. An addition to the method of atmospheric aerosol components analysis based on the data of spectral polarization measurements of the clear sky. In: *Proceedings of the 11th All-Ukrainian Scientific Conference “Astronomy and Present Day”, April 12, 2023, Vinnytsia, Ukraine* (LLC “TVORY”, 2023), p. 20.
15. D.J. Tholen, V.G. Tejfel, A.N. Cox. Planets and Satellites. In: *Allen's Astrophysical Quantities*. Edited by A.N. Cox (Springer-Verlag, 2000, 2002) [ISBN:978-1-4612-7037-9].

Одержано 22.02.25

O.S. Ovsak, V.M. Vashchenko, A.P. Vid'machenko

RECOVERY OF THE PARAMETERS
OF THE ATMOSPHERIC GAS-AEROSOL
ENVIRONMENT ABOVE THE POSITION
OF CESAR OBSERVATORY, THE NETHERLANDS

With the method previously proposed by the authors for recovering the parameters of the multimode aerosol component in the atmosphere, the data of polarization measurements of the sky above the position of CESAR Observatory, the Netherlands, at 14:55 UTC on July 9, 2013, have been analyzed. The presence of two aerosol modes with the normal-logarithmic particle size distribution is revealed, and some of their microphysical parameters are recovered. The following parameter values are determined for the coarse-dispersed mode: the real part of the refractive index $n_r = 1.53$, the effective radius of the particles $r = 0.9 \mu\text{m}$, the dispersion $\sigma^2 = 0.36$, and the weighting factor of this mode in the total degree of linear polarization of

the aerosol mixture $\text{coef}_1 = 0.1$. For the fine-dispersed mode, $n_r = 1.49$, $r = 0.11 \mu\text{m}$, and $\sigma^2 = 0.4$. The quantitative ratio between the indicated aerosol modes in the air above the observation position is estimated to be approximately 1 : 9. The spectral values of the relative contribution of gas scattering were determined: $\beta(870 \text{ nm}) = 0.3$ and $\beta(675 \text{ nm}) = 0.46$. The incorrectness of using the single Rayleigh scattering model in the short-wavelength region of the visible light spectrum at high air saturation levels with aerosol has been pointed out. A substantial influence of multiple light scattering on the results of polarimetric measurements at a wavelength of 441 nm under the specified atmospheric conditions of sky observation has been demonstrated.

Keywords: earth's atmosphere, polarization measurements, degree of linear polarisation, aerosol, recovery of microphysical parameters.